

济阳、临清拗陷及鲁西地区中新生代构造演化对比分析

姜慧超^{1,2} 张 勇^{3,4} 任凤楼² 张交东⁵

(1. 同济大学, 海洋与地球科学学院, 上海 200092; 2. 中国石化胜利油田分公司地质科学研究所, 山东 东营 257015;

3. 国土资源部海洋油气资源和环境地质重点实验室, 山东 青岛 266071;

4. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071;

5. 中国石化胜利油田分公司东胜公司, 山东 东营 257015)

摘要:通过对横跨济阳、临清拗陷及鲁西地区的 6 条地震平衡剖面或正演构造模型的分析表明:该区古近纪伸展速率大大快于中生代,尤其表现在古近纪早期($E_{1-2k}+E_{2-3s}^4$),济阳拗陷大于临清拗陷,鲁西地区最小。济阳拗陷的东营与惠民凹陷原型盆地的发育可大致分为 5 个阶段,中生代时期东部伸展量明显大于西部,东部在白垩纪末期有过强烈的剥蚀,推测这与中生代沿郯庐断裂裂谷较发育有关,东部裂陷剧烈,白垩纪末构造反转亦强烈。沙河街组四段—孔店组时期东营与惠民凹陷伸展量相近,属于走滑拉分的沉积盆地,沙河街组三段以后,东西部再次差异发展,西部伸展明显大于东部。整个中生代垂向上表现为裂陷强,反转亦强;平面上表现为类似翘翘板运动。临清拗陷由于处在强裂陷的过度部位而使其变换构造发育,断陷湖盆不能持续稳定的发育,因此成烃条件较差。

关键词:平衡剖面;构造演化;中新生代;济阳拗陷;临清拗陷;鲁西地区

中图分类号: P542+.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2008)05-0963-12

济阳、临清拗陷及鲁西地区,其新生代含油气性有很大差异,济阳是油气富集区,而临清拗陷则油气贫乏。鲁西地区(尤其是鲁西南盆地群)与济阳、临清拗陷古近纪时处于相同的大陆动力学环境。因此,它们之间的原型盆地类型、展布规律、构造形态、沉积充填以及发育过程等必然存在着一定的相似性和密切的相互联系。曾有学者研究过鲁西地区与盆地覆盖区的对比^[1]。鲁西与济阳、临清拗陷的类比研究,有助于揭示济阳拗陷古近纪原型盆地构造发育史。新生代除了有新的构造形迹外,也继承和改造中生代的构造面貌,通过不同地区中新生代构造的分析有助于在时间和空间上探索构造变动的异同和变换。

沉积盆地的形成和演化受基底构造和断裂作用控制,并与各构造运动阶段基底伸展变形密切相关。利用二维区域地震剖面开展构造演化史恢复,认识

盆地形成和演化过程,既可以动态显示构造变形历史,又可从中获得关于基底伸展和断裂活动的量化信息。有关盆地基底伸展量的计算,国内外研究者提出过多种方法,可以归纳为以下 5 类:三角算法^[2]、分数维法^[3]、古构造恢复法^[4]、长度平衡法^[5]、剖面平衡法^[6]。其中剖面平衡法为目前较完善的方法,其原理就是面积不变原则:即在垂直于断陷边界主断裂的横剖面上,被沉积物充填的断陷面积等于上盘侧向上移开的面积。据这一原理,运用盆地地层逐层回剥技术和方法,并反复拟合盆地内部构造形态,就可复原出不同时代盆地内部构造变形与沉积层连续剖面,并可定量计算各构造阶段地壳水平伸展参数。

平衡剖面分析更多的是用于挤压构造^[7,8],用于构造伸展区的分析实例较少^[9]。济阳拗陷作为中国东部渤海湾盆地一个油气最富集的次级构造单元,一

收稿日期:2008-01-22;改回日期:2008-03-25

基金项目:中国石油化工股份有限公司“十五”重点项目(P03007)资助。

作者简介:姜慧超,男,1969年生,博士生,高级工程师,主要从事油气勘探综合研究工作;E-mail:dkyjhc@sohu.com。

直以来是构造地质和石油勘探研究的重点地区,前人就济阳拗陷构造演化历史和基底伸展变形已经做过一些研究^[2,10-14],但拗陷内部主要次级凹陷对比及与周边拗陷、鲁西等地区的对比研究较少,对这一地区中生代地壳伸展变形研究亦较少。对于鲁西隆起区,不但是中生代,新生代的构造演化研究也很少。故选取了6条较有代表性的区域剖面(图1),考虑到中生代除了济阳拗陷等因临近郯庐断裂受其左行派生应力影响表现为NE-SW向伸展外,该区基本为NW-SE向伸展及挤压交替,经过古—始新世(孔店组—沙河街组四段沉积期)的近南北向伸展的构造体制转换,到渐新世继续NW-SE向伸展,但此时的大地构造背景与中生代已迥异^[15-18],故此济阳拗陷整体表现为北断南超格局。基于此,济阳拗陷

选择了3条南北向剖面,即:济阳拗陷中部南北向L568测线,做为对比的剖面是:济阳拗陷东部东营凹陷南北向L616测线与西部惠民凹陷南北向L484测线和一条东西向剖面,济阳拗陷与鲁西隆起之间并穿越昌潍拗陷的L58测线。临清拗陷选择一条北西—南东向剖面:跨越馆陶凸起—冠县凹陷—莘县凹陷—鲁西隆起的LQ-421测线。鲁西隆起区由于没有平行于伸展方向的地震测线,故以穿越菏泽凸起—汶上凹陷—泗水凹陷的LN90-151测线近似代替。通过对6条平衡剖面构造演化史恢复正演模型的建立及伸展参数计算,分析了不同地区,不同地质时期构造活动的差异及原因。

1 平衡地质剖面与构造发育史恢复方法

依据平衡地质剖面原则进行构造发育史恢复,具体包括以下几个步骤:首先,按照所研究地区岩层的分层速度结构对所测地震反射时间剖面进行转换,将之转换为深度剖面;第二,根据标准层、波组特征和实际钻井地质分层数据详细划分层位和开展精细构造解释;第三,在前两步的基础上,可在地震剖面上任意位置上提取未有井钻穿的深部地层的埋深及厚度数据;第四,结合分层厚度数据和地质时代数据,利用沉降分析中的地层回剥技术,恢复剖面上的关键实钻井或虚拟井的地层埋藏史,求得各地质历史时期的地层古厚度。正如Allen^[19]指出的那样,因为剖面长度在各构造演化阶段都要发生变化,故此剖面上虚拟井的位置亦是不断变化,需要在剖面上不断移动和重钻。笔者使用了专业计算软件进行埋藏史模拟计算,各不整合面之上的剥蚀厚度主要通过目前残留残余厚度去压实恢复并参考研究成果进行估算。第五,利用不同地质时期地层古厚度,不断剥离剖面中最上部层位,通过反复测量和调整,在保持当前所处阶段至现今的各阶段基底拆离面以上之剖面面积守恒的前提下,最终复原出每一阶段的古构造面貌。应用以上方法,笔者对4条平衡剖面进行了构造演化史恢复,对2条剖面建立了正演模型(图2~7)。

2 典型区域大剖面运动学及构造演化史分析

鉴于每条区域剖面所处的构造位置不同,地震

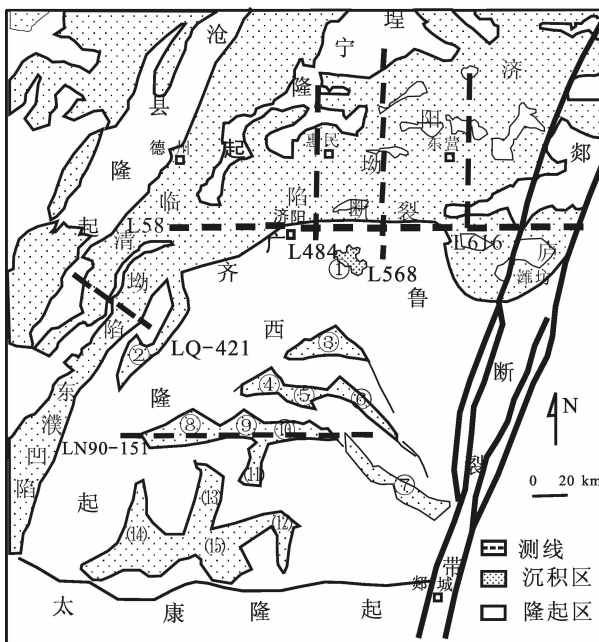


图1 研究区构造略图及6条剖面分布位置图

- ①—淄博凹陷;②—寿张凹陷;③—莱芜凹陷;④—汶西凹陷;
⑤—汶东凹陷;⑥—蒙阴凹陷;⑦—平邑凹陷;⑧—汶上凹陷;
⑨—宁阳凹陷;⑩—泗水凹陷;(11)—曲阜凹陷;(12)—滕县
凹陷;(13)—济宁凹陷;(14)—成武凹陷;(15)—鱼台凹陷

Fig.1 Structural sketch map and location of six section in the study area

- ①—Zibo subbasin;②—Shouzhang subbasin;③—Laiwu subbasin;
④—Wenxi subbasin;⑤—Wendong subbasin;
⑥—Mengyin subbasin;⑦—Pingyi subbasin;⑧—Wenshang
subbasin;⑨—Ningyang subbasin;⑩—Sishui subbasin;
(11)—Qufu subbasin;(12)—Tengxian subbasin;(13)—Jining
subbasin;(14)—Chengwu subbasin;(15)—Yutai subbasin

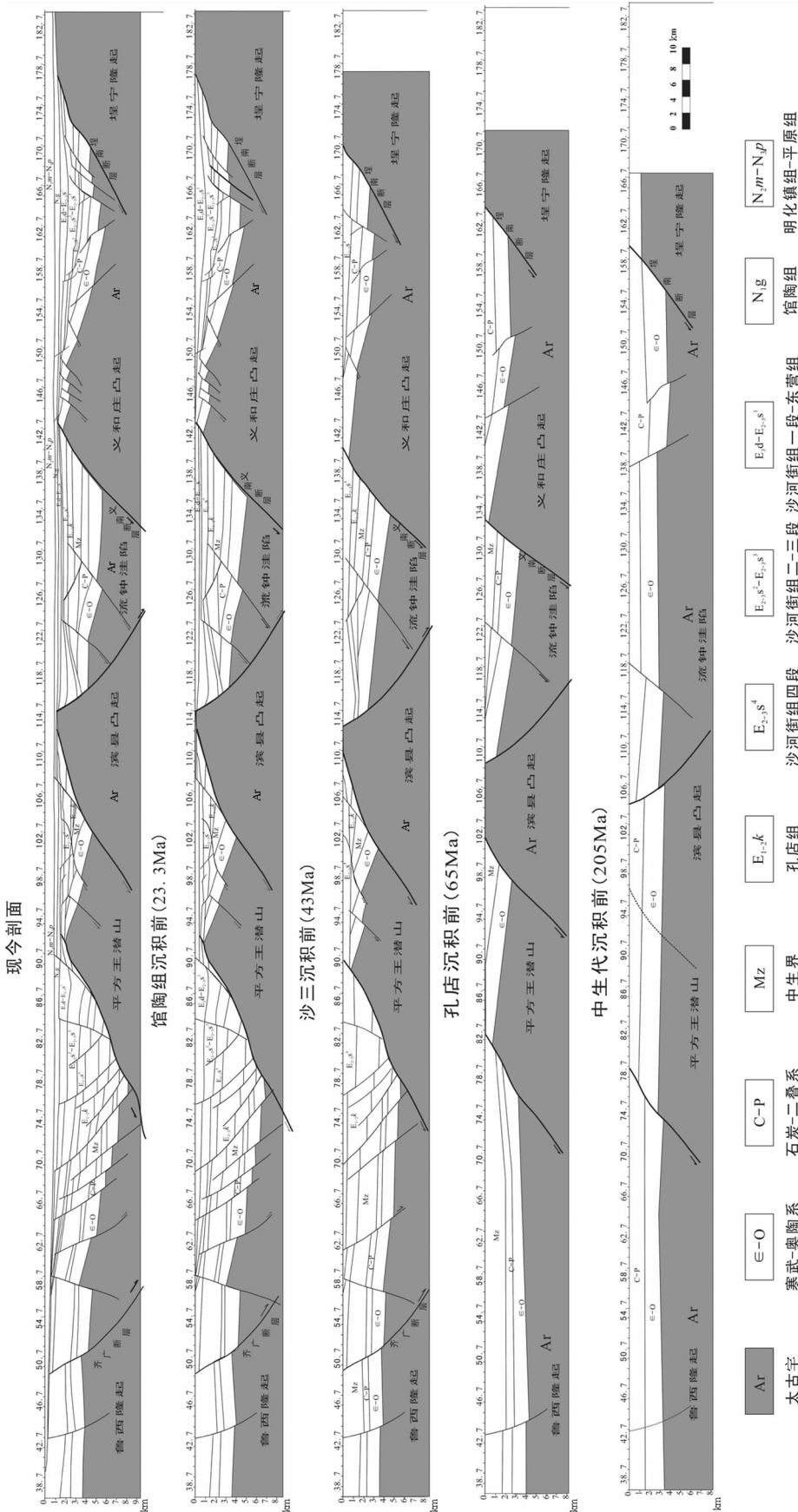


图 2 济阳坳陷 L568 构造发育平衡剖面
Fig.2 Balanced structural section of line L568 in the Jiyang depression

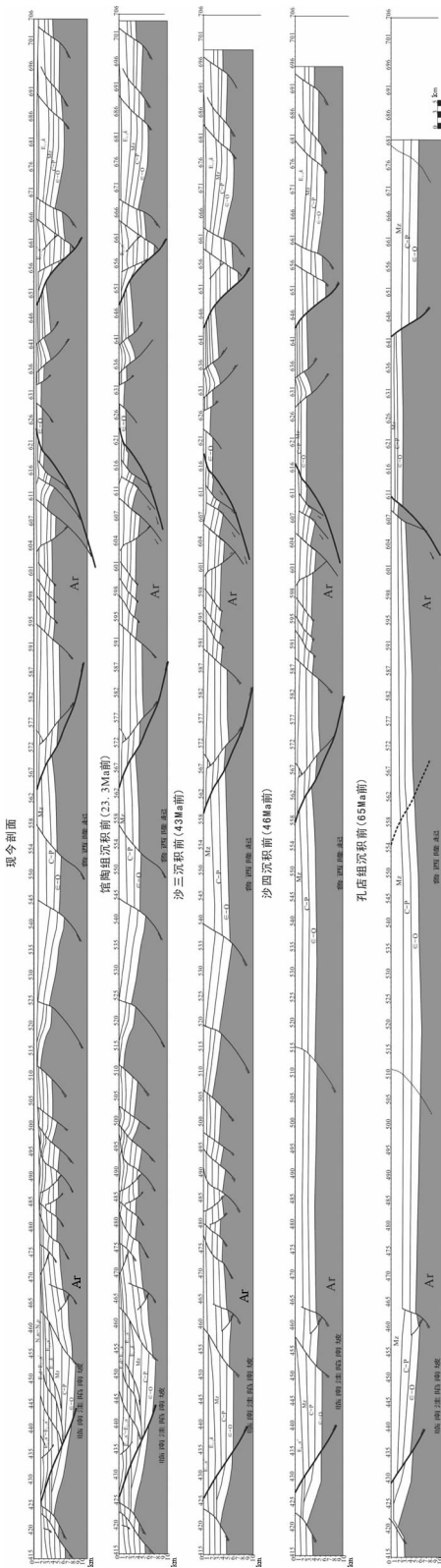


图3 济阳-昌潍拗陷 L58 构造平衡剖面

Fig.3 Balanced structural section of line L58 in the Jiyang-Changwei depression

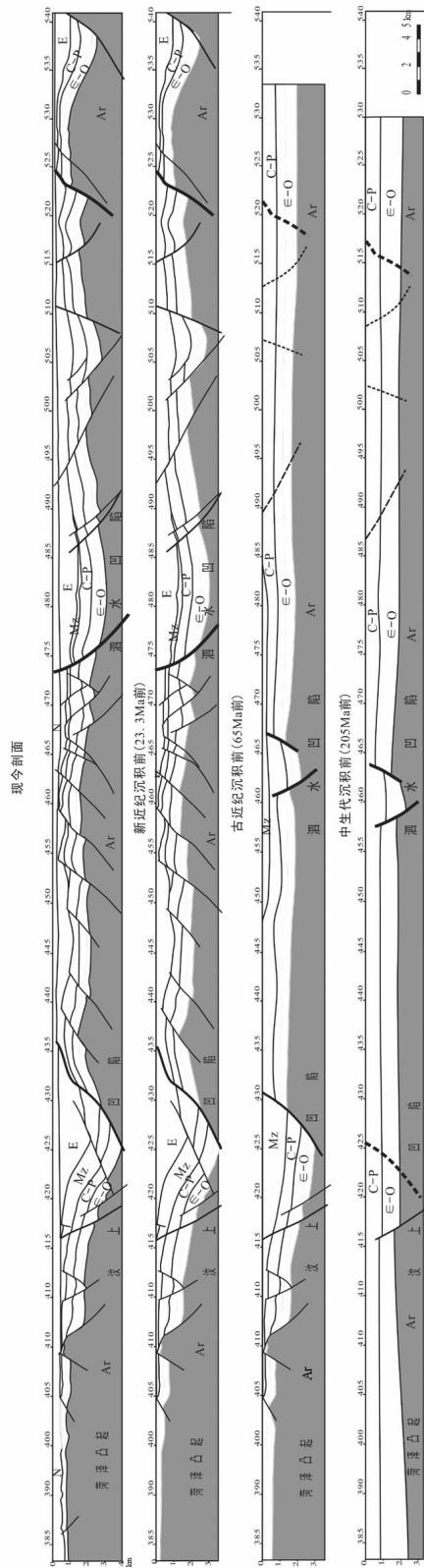


图4 鲁西地区 LN90-151 构造平衡剖面

Fig.4 Balanced structural section of line LN90-151 in the Luxi area

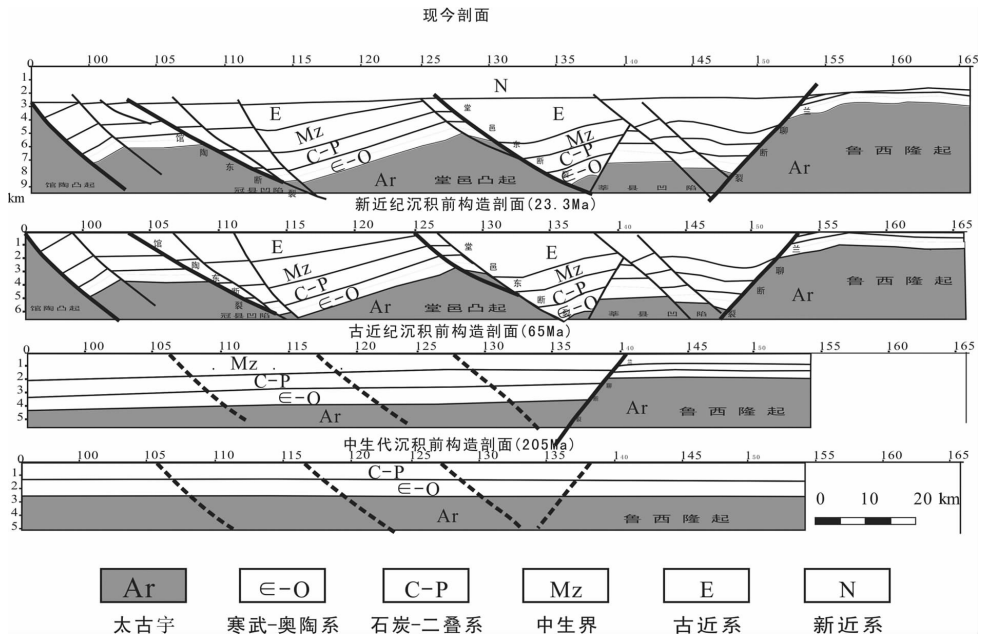


图 5 临清拗陷 LQ-421 测线构造发育平衡剖面

Fig 5 Balanced structural section of line LQ-58 in Linqing depression

地质解释精度也不同,因此每条剖面将按不同的构造演化阶段划分来进行构造恢复和伸展参数量化计算和分析,计算方法参阅曹忠祥^[20],4条剖面不同阶段的伸展率、伸展系数、伸展速率数据表及对比分别见表 1。

2.1 济阳拗陷 L568 测线(图 2)

该剖面位于济阳拗陷中部,长度为 147.16 km。构造发育史划分为 5 个阶段,即馆陶组至平原组、沙河街组三段至东营组、孔店组至沙河街组四段、中生代及前中生代。由平衡地质剖面上 6 条主要控凹拆离断层得到基底滑脱面深度介于 12.6~17.4 km,平均 13.8 km。东营组末期,济阳拗陷整体进入盆地拗陷演化的热沉降阶段,岩石圈拉张活动基本停止。因此,这一阶段盆地伸展量和伸展率基本为零。沙河街组三段至东营组、孔店组至沙河街组四段及中生代 3 个阶段的地层伸展参数及对比见表 1。可以看出,沙三段至东营组时期伸展量显著小于沙四段至孔店组期间的数值,伸展率前一阶段(13.01%)大于前一阶段(5.62%)接近一倍,伸展速率前一阶段(5.91 $\text{mMa}^{-1}\text{km}^{-1}$)也显著快于前一阶段(3.36 $\text{mMa}^{-1}\text{km}^{-1}$)。说明济阳拗陷 $E_{1-2}k+E_{2-3}^4$ 时期与 $E_{2-3}^3+E_{3}d$ 时期分别处于不同的构造体制控制之下,与郯庐断裂在沙四晚期末由左旋引张转变为右旋拉分的区

域构造背景相一致^[20]。古近纪的伸展量(25.01 km)和伸展率(20.47%)亦均大于中生代(12.55 km 和 11.45%)约一倍,而伸展速率(4.91 $\text{mMa}^{-1}\text{km}^{-1}$)则显著快于中生代,约是中生代(1.05 $\text{mMa}^{-1}\text{km}^{-1}$)的 5 倍。

2.2 L568 线东侧的东营凹陷南北向 L616 测线

与 L568 线对比的第一条测线是东营凹陷南北向 L616 测线(图 6),从该线的地震时间剖面及所做的正演模型可分析其构造发育史分为 6 个阶段:(1)伸展前初始状态:是指古生代海相沉积地层在研究区内处于近水平状态的台地相沉积,符合传统理论华北地台的盖层沉积所处的构造环境。地质资料表明在鲁西地区,中生代沉积之前没有明显的构造变形。(2)中生代裂谷阶段,本地区发生第一次裂谷作用,伴随有强烈的断陷沉积和火山活动。地壳水平伸展量估算为 8 km,半地堑中部原始沉积厚度可达 4000 m 左右。盆地原始宽度约为 43 km。(3)白垩纪末剥蚀阶段:根据 616 测线地震剖面的中生界地层遭剥蚀所产生的角度不整合现象和断层上下盘古生界地层的剥蚀程度,笔者推测白垩纪末期发生过强烈的剥蚀作用,剥蚀幅度可达 1750~3000 m,在这里笔者选取最小剥蚀厚度(1750 m)进行正演。此时中生代残余盆地的宽度仅约为 27 km,比中生代原型

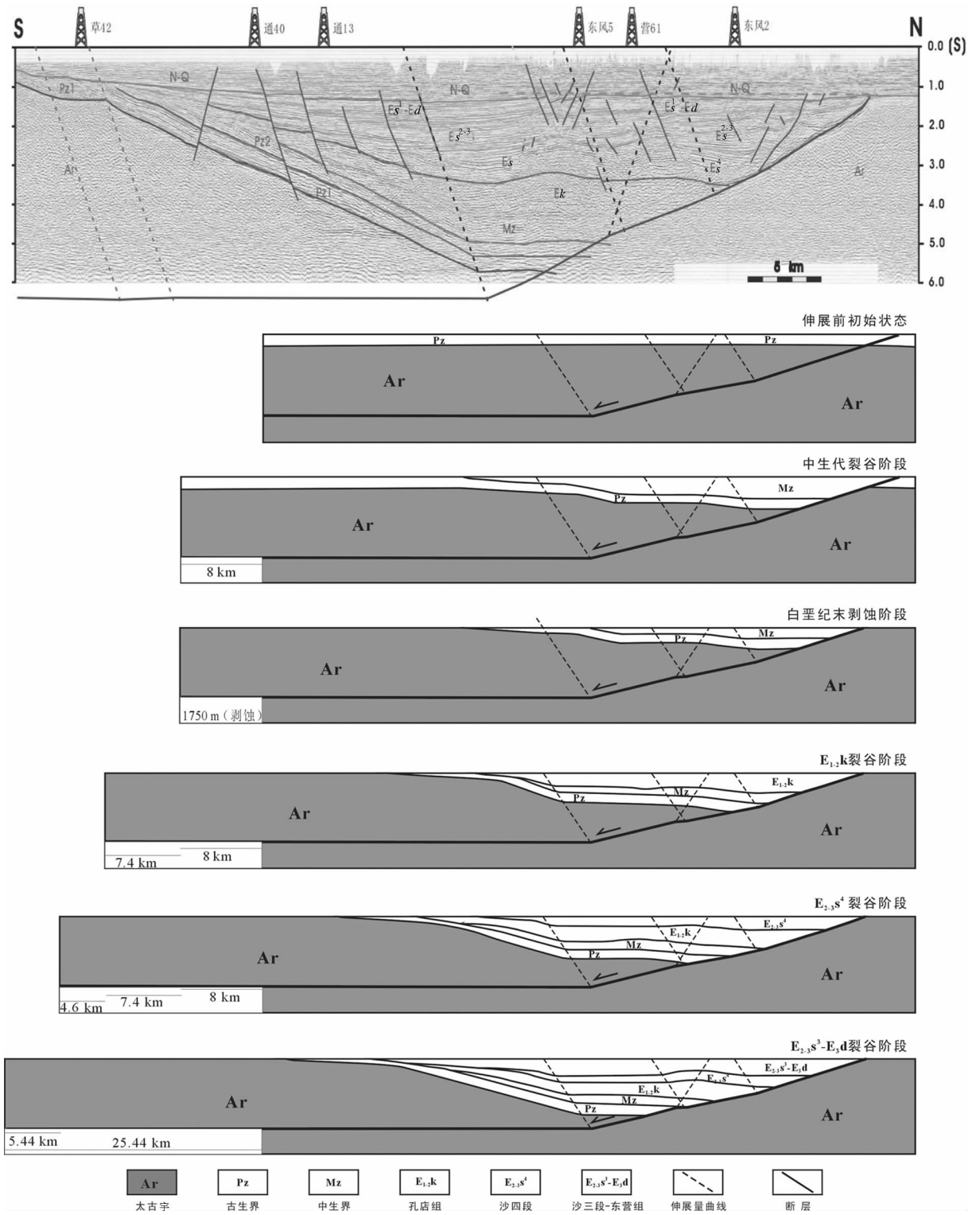


图6 东营凹陷 L616 地震测线地质剖面及正演构造发育模型
 Fig.6 Geological section and forward structural evolution model of seismic line L616 in the Dongying subbasin

表 1 4 条剖面阶段伸展量、伸展率、伸展系数与伸展速率
Table 1 Amounts, proportions, coefficients and rates of extension of four sections

测线号	构造阶段	剖面长度 /km	阶段伸展量 /km	阶段伸展率 /%	伸展系数 f	阶段平均伸展速率 m.Ma ⁻¹ .km ⁻¹
济阳拗陷 L568	沙三段至东营组(E _{2-3s} ³ +E _{3d})	138.02	9.14	5.62	1.07	3.36
	孔店组至沙四段(E _{1-2k} +E _{2-3s} ⁴)	122.15	15.87	13.01	1.13	5.91
	古近纪(E)	138.02	25.01	20.47	1.20	4.91
	中生代(M _z)	109.60	12.55	11.45	1.11	1.05
	新生代和中生代(C _z +M _z)	138.02	37.56	34.27	1.34	2.27
济阳拗陷 L58	沙三段至东营组(E _{2-3s} ³ -E _{3d})	283.31	7.69	2.71	1.03	1.38
	孔店组至沙四段(E _{1-2k} +E _{2-3s} ⁴)	268.07	15.24	5.68	1.06	2.58
	古近纪(E)	283.31	22.93	8.55	1.09	2.05
	中生代(M _z)	245.90	21.17	8.57	1.09	0.76
	新生代至中生代(C _z +M _z)	283.31	44.1	17.86	1.18	1.19
鲁西隆起 LN90-151	孔店组和沙四段(E _{1-2k} +E _{2-3s} ⁴)	150.05	7.55	5.03	1.05	2.29
	中生代(M _z)	145.60	3.45	2.35	1.02	0.21
	新生代和中生代(C _z +M _z)	150.05	11.0	7.50	1.08	0.50
临清东部 LQ-421	古近纪(E)	59.5	10.6	17.82	1.18	4.27
	中生代(M _z)	55.6	3.9	7.0	1.07	0.62
	新生代和中生代(C _z +M _z)	59.5	14.5	25.1	1.26	1.69

注:剖面长度指相应构造阶段的初始长度。

盆地缩小将近一半。(4)孔店期裂谷阶段:孔店时期(65~46 Ma)半地堑裂谷盆地的水平伸展量约为 7.4 km。伸展速率约 390 m/Ma。盆地宽度大约 38.5 km,沉积中心厚约 3000 m。由于伸展正断层存在凸凹现象,在盆地中央发育有同沉积伸展背斜构造。(5)沙河街组四段裂谷阶段:沙四段时期(46~42 Ma)继承了孔店时期裂谷作用,水平伸展量约 4.6 km。盆地宽约 44 km。(6)E_{2-3s}³-E_{3d} 裂谷阶段:沙河街组三段—东营组时期(42~23.5 Ma)地壳水平伸展了 5.44 km。在盆地中央发育有同沉积伸展背斜构造。沙河街组三段地层不整合超覆沉积在孔店组和沙河街组四段地层之上。

2.3 L568 线西侧的惠民凹陷南北向 L484 测线

与 L568 测线进行对比的第二条测线是惠民凹陷的 L484 测线,惠民凹陷伸展断层的平衡剖面正演过程同样可以反映原型盆地的发育历史。L484 测线地震时间剖面(图 7)上的惠民凹陷也表现为一个完整的伸展断层转折褶皱。没有发现白垩纪末期剥蚀作用的可靠证据,因而只能看作没有剥蚀来处理,通过多次反复测量和试验,笔者确定了惠民凹陷构造

几何学特征以及运动学过程,将原型盆地发育分成以下 5 个阶段(图 7):(1)伸展前初始状态同东营凹陷。(2)中生代裂谷阶段:亦发生第一次裂谷作用,伴随有强烈的断陷沉积和火山活动。地壳水平伸展量估算为 3.6 km,半地堑中部原始沉积厚度可达 1400 m 左右。盆地宽度约为 60 km。(3)孔店期裂谷阶段:孔店时期(65~46 Ma)半地堑裂谷盆地的水平伸展量约为 8.6 km。伸展速率约 450m/ Ma。盆地宽度约 68 km,沉积中心厚约 2400 m。由于在伸展正断层前部存在凸凹转折现象,因此在盆地北部发育有同沉积的小型伸展背斜构造。(4)沙河街组四段裂谷阶段(46~42 Ma):继承了孔店时期裂谷作用,水平伸展量约 2.8 km。盆地宽约 70 km。(5)E_{2-3s}³-E_{3d} 裂谷阶段:沙河街组三段—东营时期(42~23.5 Ma)地壳水平伸展加大到 12 km。在盆地中央和北端发育有同沉积伸展背斜构造。

2.4 济阳—昌潍 L58 测线(图 3)

L58 测线位于济阳拗陷南部,依次穿越临清拗陷东部、鲁西南隆起和昌潍拗陷。L58 测线全长 291.0 km,构造演化史划分为 5 个阶段:N、E_{2-3s}³+

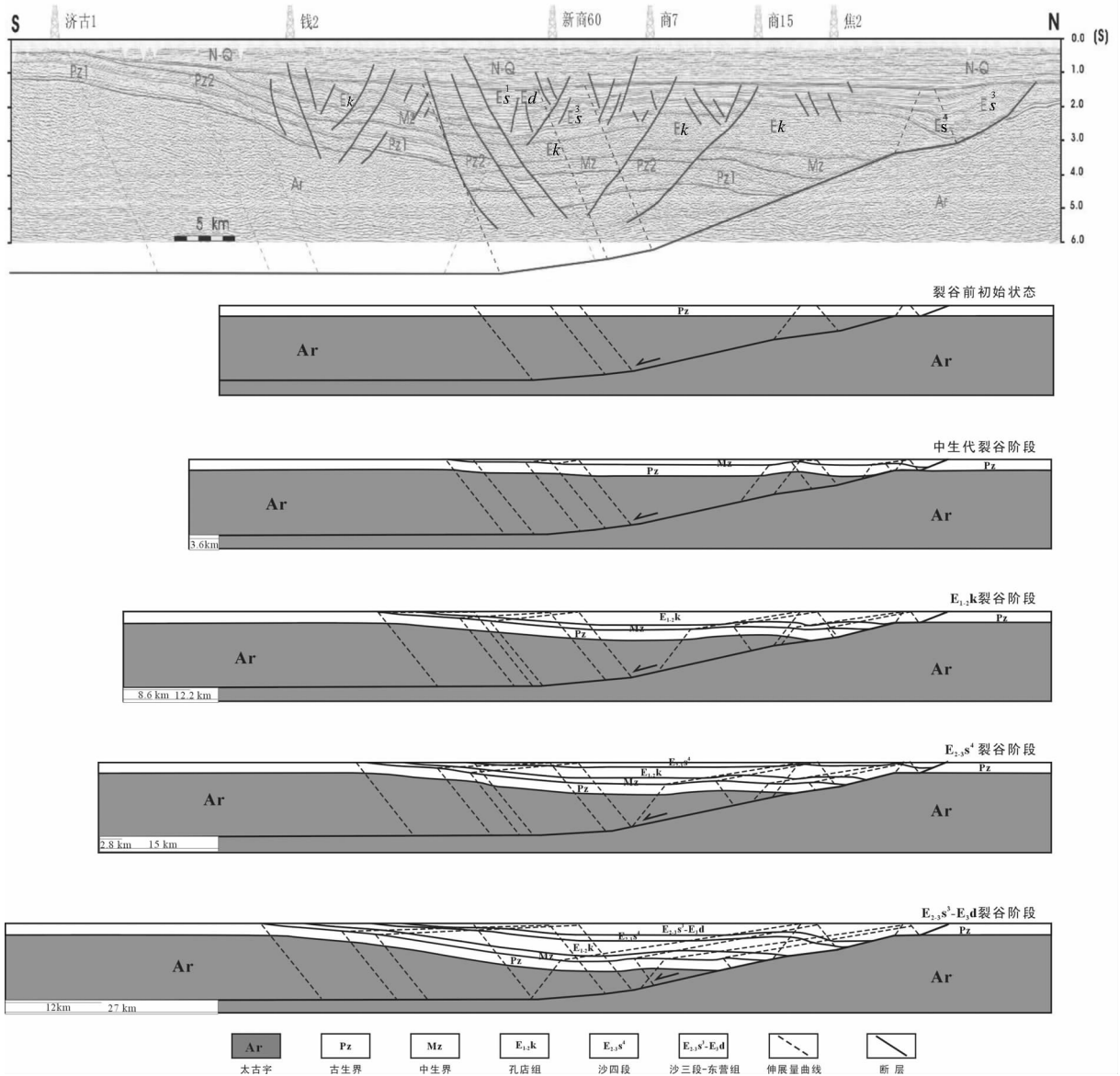


图7 济阳坳陷惠民凹陷 L484 地震测线地质剖面及正演构造发育模型

Fig.7 Geological section and forward structural evolution model of seismic line L484 in the Huimin subbasin of Jiyang depression

E_3d 、 E_{2-3s^4} 、 E_{1-2k} 及 $Pre-C_{Z_0}$ 。据平衡剖面上 7 条主要控凹拆离断层, 基底滑脱面深度最小 9.7 km, 最大 14.0 km, 平均 11.6 km。依据剖面平衡恢复结果计算各阶段的伸展量、伸展率及阶段平均伸展速率及对比 (表 1), E_{1-2k} 阶段伸展量 (11.03 km) 和伸展率 (4.11%) 最大, $E_{2-3s^3}-E_3d$ 阶段 (7.69 km, 2.71%) 阶段次之, E_{2-3s^4} 阶段伸展量 (4.21 km) 和伸展率 (1.51%) 最小, 但该阶段的平均伸展速率 ($5.03 \text{ m Ma}^{-1}\text{km}^{-1}$) 却是最大的。 $E_{1-2k}+E_{2-3s^4}$ 和 $E_{2-3s^3}+E_3d$ 相比, 前者的

平均伸展速率 ($2.58 \text{ m Ma}^{-1}\text{km}^{-1}$) 大于后者 ($1.38 \text{ m Ma}^{-1}\text{km}^{-1}$)。

L58 剖面与南北向的 L568 剖面同期对比, $E_{2-3s^3}+E_3d$ 、 $E_{2-3s^4}+E_{1-2k}$ 和整个古近纪各个阶段的伸展率, 东西向的 L58 剖面 (8.55%) 均不足南北向 L568 剖面 (20.47%) 的 1/2。各阶段的平均伸展率, 南北向 L568 剖面亦均大于东西向 L58 剖面一倍以上, 前者 (5.62%、13.01%) 分别是后者 (2.71%、5.68%) 的 2.44 倍、2.29 倍。由此可以说明, 新生代期间, 济阳坳陷南北向

拉张强度显著大于东西向,这与济阳拗陷新生代地应力场演化相对应,也同贾东等^[10]的计算结果相一致。自沙四段时期始,济阳拗陷东部郟庐断裂带由左行走滑转为右行走滑,这就使得济阳拗陷在区域北东-南南向强烈拉张应力的背景下叠加了右旋剪切应力,由此所形成的合力转化为近南北向拉张应力,从而造成地壳在南北向强烈伸展断陷。另外,济阳拗陷 $E_{1-2}k+E_{2-3}s^4$ 的伸展率显著大于 $E_{2-3}s^3+E_3d$ 的伸展率。中生代 M_z 时期两个方向伸展率(11.45%、8.57%)接近。 C_z 与 M_z 时期相比,南北向伸展率前者(20.47%)显著大于后者(11.45%),东西向伸展率两者(8.55%和 8.57%)接近。 C_z+M_z 时期南北向(34.27%)总伸展率亦大于东西向(17.86%)近 1 倍。

2.5 鲁西隆起 LN90-151 测线(图 4)

该测线现今总长度 157.6 km,划分为 N、 $E_{1-2}k+E_{2-3}s^4$ 及 MZ 3 个构造演化阶段(鲁西全区缺失 $E_{2-3}s^3+E_3d$ 地层)。由平衡剖面上 4 条主要控凹拆离断层得到基底滑脱面深度为 5.5~7.8 km,平均 5.6 km。据表 1,与其他拗陷平均伸展率相比,前者(5.03%)要比后者(15%~40%)小得多,反映了鲁西隆起区在古近纪期间,尽管鲁西隆起区与渤海湾盆地中生代共同处于整个中国东部岩石圈强烈伸展的大地构造背景之下,但由于鲁西地块岩石圈相对冷而坚硬,致使该地区中、新生代时期仅发生了相对比较微弱的基底

裂陷活动。该条构造发育剖面还显示,汶上拗陷中生代发生了一定程度的断陷沉积,泗水拗陷中生代仅发生了较小程度的拗陷沉积。

2.6 临清东部 LQ-421 测线(图 5)

临清拗陷馆陶凸起—鲁西隆起 LQ-421 测线现今总长度 70.1 km,划分为 N、E 及 MZ 3 个构造演化阶段。依据现今剖面上 3 条主要控坳拆离断层得到基底拆离面深度为 8.3~10.7 km,平均 9.1 km。该测线与济阳拗陷 L568 测线相对比,古近纪阶段的地壳平均伸展率(分别为 17.82%和 20.47%)、伸展系数(1.18 和 1.2)以及伸展速率 $m/(Ma.km)$ (4.27 和 4.91)三项参数值大小均接近,显示具有较大的拉张强度和一致的变化规律,但由这两条测线中生代的伸展参数对比可以看出,济阳拗陷中生代地壳拉张强度要大于临清拗陷东部。

3 断裂发育史比较分析

通过 4 条剖面不同阶段断层发育数量对比(图 8),发现济阳拗陷 SN 向 L568 测线 MZ、 $E_{1-2}k+E_{2-3}s^4$ 、 $E_{2-3}s^3+E_3d$ 和 N 4 个阶段分别发育 2、16、18 和 1 条新断层,显而易见, $E_{1-2}k+E_{2-3}s^4$ 和 $E_{2-3}s^3+E_3d$ 是济阳拗陷地壳拉张、断层发育的两个主要阶段。济阳拗陷 EW 向 L58 测线 $E_{1-2}k$ 、 $E_{2-3}s^4$ 和 $E_{2-3}s^3+E_3d$ 时期分别新发育 15、9 和 10 条断层,馆陶期以来没有新断层发育,表明

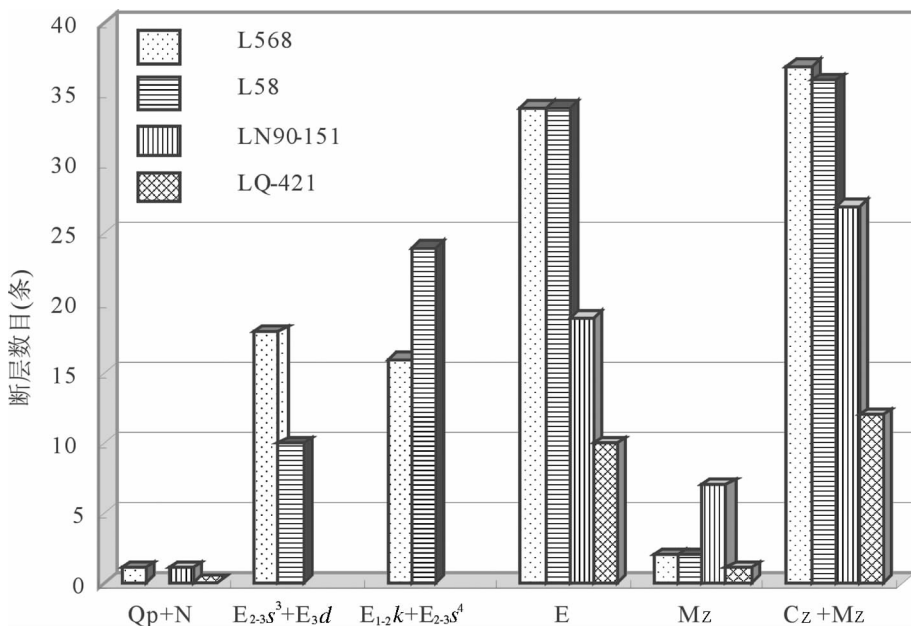


图 8 4 条剖面不同阶段断层发育数量对比

Fig.8 Comparison of fault numbers in four sections during different phases

新生代期间该剖面所处地区地壳拉张强度、断层活动性是逐渐减弱的。鲁西隆起 LN90-151 剖面现今剖面上共解释 30 条断层,其中新近纪和古近纪早期分别新发育断层 1 条和 19 条, M_2 新发育 7 条, M_2 地层沉积前剖面上断层仅有 3 条。很明显,现今地质剖面上的大约 65.7% 断层形成于古近纪早期,约 23.3% 的断层发育于中生代,显然古近纪早期亦是鲁西地区基底拉张和断裂活动最强烈的时期。临清东部 LQ-421 测线现今地质剖面上,共解释 12 条断层,其中只有 1 条是新近系期间形成的,10 条断层是在古近纪形成的,另外 1 条是在中生代形成的。可见,剖面所处地区在中生代及以前构造活动比较稳定,但在古近纪期间地壳发生了强烈伸展,相应产生了很多正断层并强烈活动。进入新近纪以来,该地区几乎未发育新的断层,构造活动趋于稳定。

4 结论与讨论

该区古近纪伸展速率大大快于中生代。中生代时期济阳拗陷和临清拗陷东部基底水平伸展率、伸展系数显著大于鲁西隆起区。新生代靠近郟庐断裂带西侧的济阳拗陷以 NS 向拉张为主,东部离郟庐断裂较远的临清拗陷以 NW-SE 为主,指示了济阳拗陷新生代期间的裂陷伸展受到东部郟庐断裂走滑活动的强烈影响。鲁西隆起区古近纪和始新世早期,伸展活动比较微弱,中生代伸展率亦很小。该区古近纪断层发育数量大大多于中生代。古近纪是断层发育的主要时期,并且在整个古近纪期间均有断层发育。

如前文所述,济阳拗陷的东营与惠民凹陷原型盆地的发育可大致分为 5 个阶段,两凹陷对比发现中生代时期东部伸展量明显大于西部,东部在白垩纪末期有过强烈的剥蚀作用;沙河街组四段—孔店组时期东营与惠民凹陷伸展量相近,属于走滑拉分的沉积盆地,沙河街组三段以后,东西部再次差异发展,西部伸展明显大于东部。推测这与中生代沿郟庐断裂裂谷较发育有关,东部裂陷剧烈,白垩纪末构造反转亦强烈。整个中生代垂向上表现为裂陷强,反转亦强;平面上表现为类似翘翘板运动。

济阳、临清拗陷和鲁西隆起结晶基底在中新生代伸展演化过程中,滑脱面深度有明显差别。济阳拗陷基底滑脱面深度平均为 12.7 km,鲁西隆起平均为 5.6 km,临清拗陷东部平均为 9.1 km。依据剖面

平衡恢复结果计算各阶段的伸展量、伸展率及阶段平均伸展速率表明古近纪早期($E_{1-2k}+E_{2-3s^4}$)是该区基底拉张和断裂活动最强烈的时期,大于中生代及古近纪晚期,其中济阳拗陷大于临清和昌潍拗陷大于鲁西地区。从不同历史时期伸展幅度看,临清拗陷与其他地区的差异主要表现在两个方面;一是在古近纪的破裂伸展过程中,作为拉张应力释放带的伸展主断层不明确(或不统一),造成沉降中心不断迁移,总体沉降幅度不大;二是构造反转活动相对较强,各裂陷幕之间的反转不整合较明显,如沙四段和沙三段之间。其主要的原因是基底断层断裂活动不能持续发展的结果,从表观方面看,是由于没有形成大规模的主控边界断层,而从本质方面看,可能是该区的构造应力场和应变场经常改变,导致基底断裂活动不能朝某个方向持续发展。其深部因素推测是因为处于不同伸展中心的过渡区,因而变换构造(或调节构造)及其发育有关^[21-23]。

参考文献(References):

- [1] 李理, 钟大赉, 时季明. 鲁西隆起和济阳拗陷及新生代隆坳耦合关系[J]. 地质学报, 2007, 1(9):1215-1228.
Li li, Zhong Dalai, Shi Jiming. Cenozoic Uplifting/subsidence coupling between the west Shandong rise and the Jiyang depression [J]. Acta Geologic Sinica, 2007, 1(9):1215-1228 (in Chinese with English abstract)
- [2] 田在艺, 韩屏. 渤海断陷盆地拉张量分析与油气潜力 [J]. 石油学报, 1990, 11(2): 1-12.
Tian Zaiyi, Han Ping. Extension Analysis on the Bohai Faulted Basin and It's Hydrocarbon potentiality [J]. Acta Petrolei Sinica, 1990, 11(2): 1-12(in Chinese with English abstract).
- [3] 刘绍文, 王良书, 刘波. 拉张盆地伸展量的分形分析—以渤海盆地为例[J]. 地质论评, 2001, 47(3):229-233.
Liu Shaowen, Wang Liangshu, Liu Bo. Fractal analysis of extensional quantity of the extensional basin—taking the Bohai Basin as an example[J]. Geological Review, 2001, 47(3):229-233(in Chinese with English abstract).
- [4] 刘池洋. 渤海湾盆地的裂陷伸展与断块翘倾. 见:赵重远,刘池洋主编. 华北克拉通沉积盆地形成与演化及其油气赋存 [C]//. 西安:西北大学出版社, 1990.
Liu Chiyang. Chasmic extension and fault block tilting in Bohai Bay basin [C]//Zhao Chongyuan, Liu Chiyang (eds.). Forming and Evolution of North China craton and Hydrocarbon Occurrence in it. Xi'an:Northwest University Press, 1990(in Chinese).
- [5] Ian Davison. Listric normal fault profiles: calculation using bed-length balance and fault displacement [J]. Journal of Structural Geology, 1985, 8(2):209-210.

- [6] Gibbs A. D. Balanced cross-section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics [J]. *Journal of Structural Geology*, 1983, 5(2):153-160.
- [7] Shaw J H, Stephen C. Hook, Edward P. Sitohang. Extensional fault-bend folding and synrift deposition: an example from the Central Sumatra Basin, Indonesia [J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(3): 361-379.
- [8] Suppe J. Geometry and Kinetics of fault-bend folding [J]. *American Journal of Science*, 1983, 283:685-721.
- [9] 颜丹平, 田崇鲁, 孟令波, 等. 伸展构造盆地的平衡剖面及其构造意义—以松辽盆地南部为例 [J]. *地球科学*, 2003, 28(3):275-280.
Yan Danping, Tian Chonglu, Meng Lingbo, et al. Balanced geological section for extensional tectonic basin and Its implication; An example from Southern Songliao Basin [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geoscience*, 2003, 28 (3):275-280 (in Chinese with English abstract).
- [10] 贾东, 陈竹新, 张榘, 等. 东营凹陷伸展断弯褶皱的构造几何学分析 [J]. *大地构造与成矿学*, 2005, 29(3):295-302.
Jia Dong, Chen Zhuxin, Zhang Qie, et al. Structural geometric analysis on the extensional fault-bend fold in the Dongying depression [J]. *Geotectonica Et Metallogenia*, 2005, 29(3):295-302 (in Chinese with English abstract).
- [11] 刘池洋. 拉伸构造区古地质构造恢复和平衡剖面建立—以渤海湾盆地为例 [J]. *石油实验地质*, 1988, 10(1):33-43.
Liu Chiyang. The reproduction of paleo-structure and the establish of equilibrium for extension structure area ——an example of Baohai gulf basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1988, 10(1):33-43 (in Chinese with English abstract).
- [12] 谢锐杰, 漆家福, 王永诗. 渤海湾盆地东营凹陷北部地区新生代构造演化特征研究 [J]. *石油实验地质*, 2004, 26(5):427-431.
Xie Ruijie, Qi Jiafu, Wang Yongshi. Characteristics of the Cenozoic structural evolution in the north of the dongying sag, the Bohaiwan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2004, 26(5): 427-431 (in Chinese with English abstract).
- [13] 陆克政, 漆家福, 等. 渤海湾新生代含油气盆地构造模式 [M]. 北京:地质出版社, 1997.
Lu Kezheng, Qi Jiafu, et al. Tectonic model of Cenozoic petroliferous basin Bohai Bay Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997 (in Chinese with English abstract).
- [14] 肖焕钦, 陈广军, 李长宝. 济阳坳陷盆地拉张量及其石油地质意义 [J]. *石油实验地质*, 2002, 24(1):13-18.
Xiao Huanqin, Chen Guangjun, Li Changbao. Basin Extensional amount of the Jiyang depression and its Petroleum geological significance [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2002, 24(1):13-18 (in Chinese with English abstract).
- [15] 吴根耀, 马力, 陈焕疆, 等. 苏皖地块构造演化、苏鲁造山带形成及其耦合的盆地发育 [J]. *大地构造与成矿学*, 2003, 27(4) 337-353.
Wu Genyao, Ma Li, Chen Huanjiang. Tectonic evolution of the Su-Wan Block, creation of the Su-Lu orogen and orogenesis coupled basin developing [J]. *Geotectonica Et Metallogenia*, 2003, 27(4) 337-353 (in Chinese with English abstract).
- [16] 漆家福. 渤海湾新生代盆地的两种构造系统及其成因解释 [J]. *中国地质*, 2004, 31(1):15-22.
Qi Jiafu. Two tectonic systems in the Cenozoic Bohai Bay basin and their genetic interpretation [J]. *Geology in China*, 2004, 31(1): 15-22 (in Chinese with English abstract).
- [17] 徐振中, 陈世悦, 王永诗. 渤海湾地区中生代构造活动与沉积作用 [J]. *中国地质*, 2006, 33(1):201-211.
Xu Zhenzhong, Chen Shiyue, Wang Yongshi. Mesozoic tectonic activities and sedimentation in the Bohai Gulf area [J]. *Geology in China*, 2006, 33(1):201-211 (in Chinese with English abstract).
- [18] 任凤楼, 张岳桥, 邱连贵, 等. 胶莱盆地白垩纪构造应力场与转换机制 [J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 31(2):157-167.
Ren Fenglou, Zhang Yueqiao, Qiu Liangui, et al. Structural stress field evolution of Jiaolai Basin in the Cretaceous [J]. *Geotectonica Et Metallogenia*, 2007, 31(2):157-167 (in Chinese with English abstract).
- [19] Allen P A, Allen J R. Basin analysis principles. London: Blackwell Scientific Publications. 1990:263-281.
- [20] 曹忠祥. 营口-潍坊断裂带新生代走滑拉分-裂陷盆地伸展量、沉降量估算 [J]. *地质科学*. 2008, 43(1):65-81.
Cao Zhongxiang. The extension and subsidence quantity calculation of pull-apart-rift basin along Yingkou-Weifang Fault Zone in Cenozoic [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2008, 43 (1):65-81 (in Chinese with English abstract).
- [21] 周章保, 汪新文, 陶国强. 临清坳陷东部新生代盆地变换构造分析及与油气关系 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(4):91-98.
Zhou Zhangbao, Wang Xinwen, Tao Guoqiang. The analysis of cenozoic transition structures and their relation with petroleum accumulation in the east of Linqing Depression [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22 (4):91-98 (in Chinese with English abstract).
- [22] 刘剑平, 汪新伟, 汪新文. 临清坳陷变换构造研究 [J]. *地质科技情报*, 2004, 23(4):51-54.
Liu Jianping, Wang Xinwei, Wang Xinwen. Transition structures in Linqing Depression [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2004, 23(4):51-54 (in Chinese with English abstract).
- [23] 任凤楼, 柳忠泉, 邱连贵. 2008. 渤海湾盆地新生代各坳陷沉降的时空差异性 [J]. *地质科学*, 2008, 43(3):35-42.
Ren Fenglou, Liu Zhongquan, Qiu Liangui. Space-times discrepancy of depressions of Bohai bay basin in Cenozoic [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2008, 43(3):35-42 (in Chinese with English abstract).

Comparative analysis of Meso–Cenozoic tectonic evolutions of the Jiyang and Linqing depressions and Luxi area

JIANG Hui–chao^{1,2}, ZHANG Yong^{3,4}, REN Feng–lou², ZHANG Jiao–dong⁵

(1. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Institute of Geological Science, Shengli Oilfield, Sinopec, Dongying 257015 Shandong, China;

3. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environment Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, Shandong, China; 4. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, Shandong, China;

5. Dongsheng Corp., Shengli Oilfield, Sinopec, Dongying 257015 Shandong, China)

Abstract: Analyses of six balanced seismic sections or forward tectonic models across the Jiyang and Linqing depressions and Luxi area show that the extension rate in the region in the Paleocene, especially in the early Paleocene, was greatly higher than that in the Mesozoic, the extension rate for the Jiyang depression being higher than that for the Linqing depression and the extension rate for the Luxi area lowest. The development of the proto basin of the Dongying and Huimin subbasins in the Jiyang depression broadly went through five phases. In the Mesozoic the amount of extension in the east was markedly large than that in the west, and strong erosion occurred in the east during the Late Cretaceous. From the above, it is inferred that: this was related to the rifting along the Tanlu fault in the Mesozoic, and rifting was intense in the east and tectonic inversion was also strong at the end of the Cretaceous. The amounts of extension of the Dongying and Huimin subbasins were close during the deposition of the Four Member of the Shahejie Formation and Kongdian Formation. They belong to strike–slip pull–apart sedimentary subbasins. After the deposition of the Third Member of the Shahejie Formation, differential development again occurred in the east and west parts: the amount of extension in the east was noticeably larger than that in the west. The whole of Meso–Cenozoic witnessed strong vertical rifting and inversion, and in a plan view movement similar to a seesawing movement was manifest. Located in the transitional place of strong rifting, the Linqing subbasin had well–developed transitional structure and thus a downfaulted lake basin was unable to develop steadily; so the hydrocarbon–forming conditions were poor.

Key words: balanced section; tectonic evolution; Meso–Cenozoic; Jiyang depression; Linqing depression; Luxi area

About the first author: JIANG Hui–chao, male, born in 1969, senior engineer, Ph.D., mainly engages in the research on petroleum geology and exploration; E–mail: dkyjhc@sohu.com.